

Contents list available at [Sinta](https://sinta)**ARMATUR**

: Artikel Teknik Mesin & Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur>**Desain dan Simulasi Sistem *Anodizing* Aluminium dengan Kontrol Arus Konstan Terintegrasi****Rahmanita Aulia Ratna Sari^{1*}, Trisma Jaya Saputra², Adityo Noor Setyo Hadi Darmo³**^{1,2,3}Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Tidar, Jalan Kapten Suparman No. 39, Kelurahan Potrobangsari, Kecamatan Magelang Utara, Kota Magelang, Jawa Tengah 56116**ARTICLE INFO****Keywords:***Anodizing, Aluminum 6061, Constant current, COMSOL Multiphysics, SolidWorks***ABSTRACT**

Conventional anodizing of Aluminum 6061 typically uses manually regulated current, which is prone to fluctuation and results in non-uniform oxide layer formation. This study designs an integrated constant-current-controlled anodizing system for Aluminum 6061 using SolidWorks and analyzes Current Density distribution and oxide layer growth through COMSOL Multiphysics 5.6 simulation. The method used is quantitative design research based on numerical simulation, comprising numerical calculation, three-dimensional design, and electro-thermal simulation. The system was designed with a 28.52-liter HDPE anodizing bath, a dual lead-cathode configuration flanking the Aluminum 6061 anode at a 100 mm gap, and a galvanostatic DC power supply of 4 Ampere/12 Volt monitored by an ACS712 sensor. Numerical calculation indicated an oxide layer mass of 1.0145 grams with a power of 48 Watts. Transient simulation showed linear oxide layer growth over time, reaching 8.98 μm at the 20th minute and 17.97 μm at the 40th minute, within the Sulfuric Acid Anodizing standard range (15–25 μm). The system proved able to maintain process stability, making it feasible for laboratory-scale implementation.

Pendahuluan

Aluminium 6061 merupakan paduan logam ringan yang tahan korosi dan mudah dibentuk, sehingga banyak digunakan dalam dunia manufaktur [1]. Untuk meningkatkan

ketahanan permukaan, aluminium umumnya diberi perlakuan *anodizing*, yaitu proses elektrokimia pembentuk lapisan oksida pelindung pada permukaan aluminium [2]. Dalam praktiknya, sistem *anodizing* di laboratorium maupun bengkel

*Corresponding author: rahmanita.aulia.ratna.sari@students.untidar.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.24127/armatur.v7i2.12484>

Received 9 July 2026; Received in revised form 3 August 2026; Accepted 4 August 2026

Available online 7 August 2026

pengujian masih banyak bersifat konvensional dengan pengaturan parameter secara manual, sehingga arus listrik dan suhu larutan sering berfluktuasi dan menghasilkan lapisan oksida yang tidak seragam [3]. Desain sistem yang kurang tepat mencakup pengaturan arus, waktu proses, suhu larutan, serta konfigurasi anoda katoda dapat menyebabkan kondisi proses tidak stabil sehingga kualitas lapisan tidak konsisten [2]. sementara proses *Sulfuric Acid Anodizing* (SAA) sendiri menuntut kontrol yang ketat untuk menghasilkan lapisan setebal 15–25 μm dalam waktu ± 40 menit [4]. Perancangan alat juga perlu mempertimbangkan keselamatan kerja mengingat proses ini melibatkan larutan elektrolit korosif dan arus DC [5].

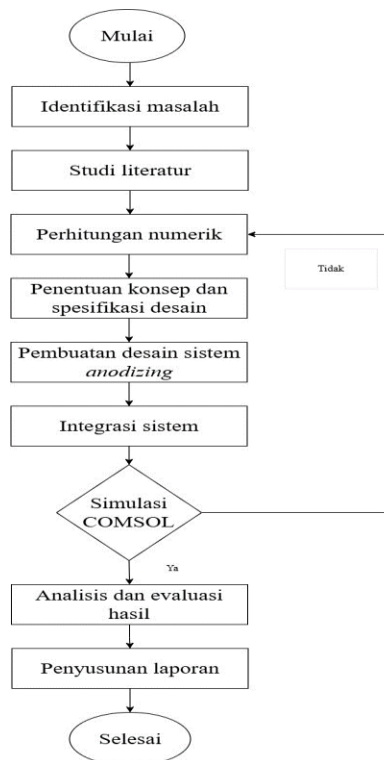
Penelitian terdahulu telah mengkaji aspek-aspek proses *anodizing* secara terpisah: variasi waktu proses terbukti berbanding lurus dengan ketebalan dan kekerasan lapisan oksida namun masih menggunakan sistem konvensional tanpa otomatisasi dan kontrol arus terintegrasi [6], sedangkan sistem conveyor *electroplating* berbasis mikrokontroler mampu mengotomatisasi pencelupan benda kerja tetapi belum mengendalikan parameter listrik proses [7]. Berdasarkan tinjauan tersebut, teridentifikasi celah penelitian (*research gap*) berupa belum tersedianya sistem *anodizing* Aluminium 6061 yang mengintegrasikan desain mekanik, kontrol arus konstan berbasis sensor, dan simulasi numerik distribusi arus-temperatur secara terpadu, padahal kontrol arus konstan berpotensi menjaga distribusi arus tetap stabil sehingga lapisan terbentuk lebih seragam [3], [5]. Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan sistem *anodizing* skala laboratorium yang terkontrol dan *repeatable*.

Penelitian ini bertujuan untuk (1) merancang sistem *anodizing* Aluminium 6061 dengan penerapan arus konstan menggunakan SolidWorks (2) melakukan simulasi menggunakan COMSOL Multiphysics untuk menganalisis distribusi arus dan temperatur pada sistem tersebut

serta (3) menganalisis pengaruh arus konstan terhadap kestabilan proses dan kualitas lapisan *anodizing* berdasarkan hasil simulasi. Kontribusi penelitian ini adalah tersedianya rancangan sistem *anodizing* terintegrasi berbasis kontrol arus konstan dan sensor ACS712 yang divalidasi secara numerik melalui simulasi *electro-thermal*, sebagai referensi pengembangan sistem *anodizing* skala laboratorium yang lebih stabil dan terkontrol [8].

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *design research* dengan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi numerik. Objek penelitian adalah sistem *anodizing* Aluminium 6061 dengan kontrol arus konstan terintegrasi, yang dirancang dan dianalisis melalui simulasi tanpa tahap realisasi fisik. Perangkat lunak yang digunakan adalah SolidWorks 2022 untuk pemodelan tiga dimensi dan COMSOL Multiphysics 5.6 untuk simulasi *electro-thermal*. Bak menggunakan *High-Density Polyethylene* (HDPE),udukan elektroda, dan susunan konduktor. Selanjutnya, model parasolid tersebut diekspor ke dalam perangkat lunak COMSOL Multiphysics 5.6 untuk dilakukan analisis simulasi multi-fisika (*multiphysics*) yang mengintegrasikan fenomena distribusi arus listrik (*Secondary Current Density Distribution*), reaksi permukaan logam (*Surface Reactions*), serta fenomena perpindahan panas transien (*electro-thermal*) [9]. Secara sistematis, urutan dan jalannya tahapan pelaksanaan penelitian ini dari awal hingga akhir disajikan secara terperinci ke dalam bentuk skema diagram alir yang tertera pada Gambar 1.



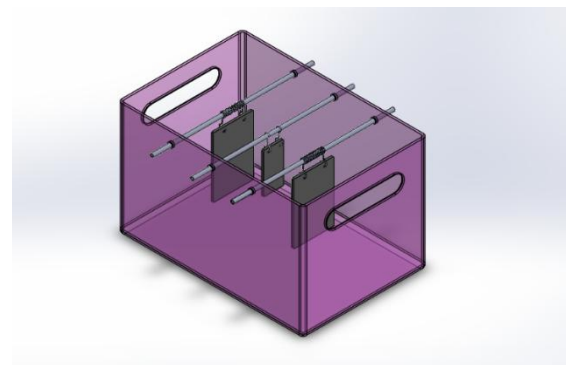
Gambar 1. Diagram Alir

Diagram alir pada Gambar 1 memuat jalur umpan balik dari tahap Simulasi COMSOL kembali ke tahap Perhitungan Numerik. Jalur ini aktif apabila solver tidak mencapai konvergensi (residual di atas toleransi *physics-controlled*) atau hasil simulasi berada di luar rentang fisis yang wajar, misalnya distribusi rapat arus yang tidak stabil atau kenaikan temperatur yang tidak realistis. Pada kondisi tersebut dilakukan peninjauan ulang terhadap parameter input numerik, meliputi kerapatan jala (*mesh*), nilai rapat arus batas (Total Current Density), konstanta laju reaksi permukaan, serta efisiensi arus, sebelum geometri dan pengaturan fisika disusun ulang dan simulasi dijalankan kembali hingga diperoleh solusi konvergen yang konsisten dengan perhitungan analitik Hukum Faraday.

a. Pemodelan Geometri

Pemodelan geometri tiga dimensi dilakukan menggunakan SolidWorks, menghasilkan satu unit stasiun kerja *anodizing* yang terdiri atas bak *anodizing*, sistem elektroda (anoda dan katoda), thinwall, power supply DC, sensor arus

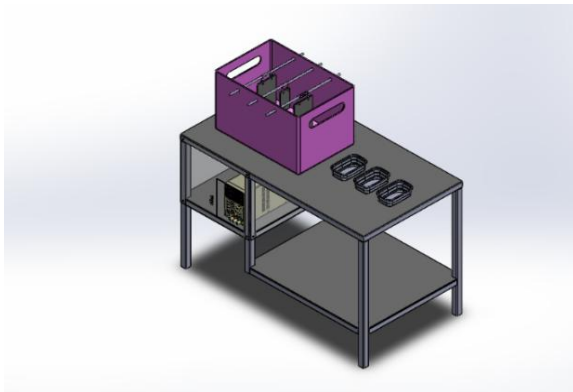
ACS712, serta rangka meja penunjang. Bak *anodizing* dirancang berbahan High-Density Polyethylene (HDPE) dengan dimensi luar 460 mm × 310 mm × 285 mm (panjang × lebar × tinggi) dan ketebalan dinding 5 mm, dengan ketinggian pengisian larutan elektrolit H₂SO₄ dibatasi konstan pada 200 mm sehingga menghasilkan volume elektrolit aktif sebesar 28,52 liter. Di dalam bak, spesimen anoda menggunakan material Aluminium 6061 berbentuk pelat persegi berukuran 100 × 50 mm dengan ketebalan 5 mm, ditempatkan tepat di titik tengah bak. Penempatan katoda ganda secara simetris ini berfungsi menghasilkan distribusi medan listrik yang homogen pada seluruh permukaan anoda sekaligus menurunkan hambatan kontak pada antarmuka elektroda–elektrolit, Visualisasi bak *anodizing* disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Bak *anodizing*

Kelistrikan sistem disuplai oleh unit power supply DC yang dikonfigurasi pada mode arus konstan (*galvanostatic*) dengan parameter keluaran nominal 4 Ampere dan 12 Volt untuk mengompensasi kenaikan resistansi internal seiring menebalnya lapisan oksida Al₂O₃. Sensor arus ACS712 berbasis *hall effect* diintegrasikan seri pada jalur output positif untuk memantau dinamika arus secara *real time* sebagai umpan balik kestabilan rapat arus. Secara teknis, pembacaan arus *real time* oleh ACS712 membentuk mekanisme kendali lingkaran tertutup (*closed-loop*) apabila arus terukur menyimpang dari titik-setel 4 Ampere akibat kenaikan resistansi internal seiring bertambahnya ketebalan lapisan oksida, *power supply* secara otomatis

menaikkan tegangan keluarannya untuk mengembalikan arus ke nilai setpoint tersebut, sehingga nilai arus konstan inilah yang menjadi parameter kondisi batas *Total Current Density* pada model simulasi COMSOL. Seluruh komponen elektrik ini didudukkan pada rangka meja penunjang berbahan baja hollow galvanis dengan dimensi ergonomis 650 mm × 500 mm × 800 mm (panjang × lebar × tinggi), menggunakan sistem dua tingkat (*two-tier system*) untuk memisahkan area basah (bak *anodizing*) dari instrumen elektronik (power supply dan sensor). Integrasi seluruh komponen tersebut menghasilkan desain *assembly* bak *anodizing* yang lengkap sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.



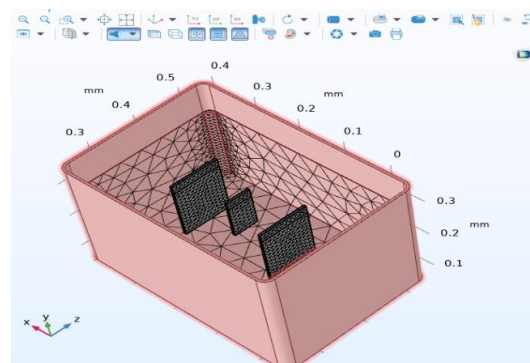
Gambar 3. Assembly Bak *Anodizing*

b. Simulasi COMSOL

Simulasi numerik dilaksanakan pada COMSOL Multiphysics 5.6 untuk memprediksi karakteristik pertumbuhan lapisan oksida Al_2O_3 pada permukaan anoda secara dinamis, terbagi menjadi lima tahapan utama yaitu persiapan geometri, pendefinisian material, konfigurasi fisika sel, komputasi numerik, dan pengolahan data (*post-processing*) [10]. Model *assembly* hasil rancangan SolidWorks diimpor ke COMSOL, kemudian sifat fisik dan elektrik masing-masing komponen ditentukan pada folder *Materials*, meliputi domain elektrolit H_2SO_4 dengan konduktivitas ionik sebesar 75 S/m, domain elektroda anoda dan katoda, serta domain plastik HDPE. Kondisi batas simulasi ditetapkan dengan suhu awal sebesar 26°C (setara suhu ruangan), seluruh dinding bak HDPE diperlakukan sebagai

batas terisolasi secara termal dan elektrik (*thermal insulation/no flux*) karena bersifat non-konduktif dan tidak dilengkapi sistem pendingin aktif, serta larutan elektrolit diasumsikan diam (stagnan) tanpa modul aliran fluida (*Laminar Flow*) sehingga efek konveksi paksa tidak diperhitungkan dalam simulasi.

Pemodelan fisis dikombinasikan dari dua modul utama. Modul *Secondary Current Density Distribution* (cd) diterapkan pada seluruh domain fluida elektrolit dan padatan elektroda untuk mengatur distribusi arus dan potensial listrik. Permukaan anoda dipasangkan fitur *Electrode Surface* dengan menu. *Electrode Phase Potential Condition* diatur pada mode *Total Current Density* bernilai konstan sebesar 150 A/m². Nilai ini diturunkan dari kondisi kontrol galvanostatis fisik pada power supply, yaitu total arus konstan $I = 4$ A yang dibagi terhadap luas permukaan aktif anoda sebesar 2,667 dm² (setara rapat arus $J = 1,5$ A/dm²); karena 1 A/dm² setara dengan 100 A/m², maka $J = 1,5$ A/dm² × 100 = 150 A/m², yang selanjutnya dimasukkan sebagai kondisi batas *Electrode Phase Potential Condition* pada domain permukaan anoda. Modul *Surface Reactions* (sr) diintegrasikan khusus pada permukaan aktif anoda untuk menghitung akumulasi pengendapan spesies pembentuk lapisan oksida, dengan konstanta laju reaksi material sebesar $5,2837 \times 10^{-5}$ mol/(m²·s) dan konsentrasi awal spesies permukaan (cs1) diatur pada 0 mol/m² sebagai penanda bahwa pada detik ke-0 lapisan oksida belum terbentuk. Tahapan pengaturan fisika dan meshing ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Meshing Domain

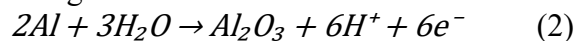
Proses meshing membagi seluruh domain geometri menjadi elemen tetrahedron menggunakan opsi User-controlled mesh dengan kerapatan jala yang lebih rapat pada batas permukaan kontak anoda-elektrolit guna menjamin konvergensi dan akurasi perhitungan. Penyelesaian persamaan diferensial dibagi menjadi dua tahapan studi: *Study 1 (Stationary)* untuk menghitung distribusi awal potensial listrik dan kerapatan arus pada kondisi tunak, serta *Study 2 (Time Dependent)* untuk mengalkulasi pertumbuhan ketebalan lapisan oksida secara transien dengan rentang waktu range (0,900,2400) yang merekam data dari detik ke-0 hingga detik ke-2400 (40 menit).

c. Persamaan Matematis

Pada permukaan elektrolit terjadi reaksi elektrolisis air yang menghasilkan ion hidroksida dan ion hidrogen sebagai berikut:



Reaksi elektrokimia keseluruhan pada permukaan anoda Aluminium 6061 yang membentuk lapisan oksida dinyatakan sebagai berikut:



Arus listrik dan waktu proses terhadap massa zat yang terbentuk pada reaksi elektrokimia dijelaskan melalui Hukum Faraday:

$$m = (M.I.t) / (n.F) \quad (3)$$

Daya listrik yang digunakan pada proses *anodizing*:

$$P = V.I \quad (4)$$

Volume Riil Cairan Elektrolit:

$$V_{cairan} = l_{bak} \times \omega_{bak} \times h_{bak} \quad (5)$$

Ketebalan fisik lapisan anoda:

$$s = \frac{m}{\rho_{oksida} \times A_{aktif}} \quad (6)$$

Kenaikan temperature global pada tanpa pendinginan (Hukum Termodinamika 1):

$$m_{fluida} = \rho \cdot V_{cairan} \quad (7)$$

Fitur *Derived Values (Surface Average)* pada COMSOL Multiphysics, dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$d = (J \cdot t \cdot M \cdot \eta) / (n \cdot F \cdot \rho) \quad (8)$$

d. Pengambilan dan Analisis Data

Analisis data dilakukan secara kuantitatif dan deskriptif melalui lima tahapan. Pertama, analisis desain sistem terhadap model 3D dengan memperhatikan kesesuaian dimensi dan geometri komponen, pemilihan material, serta hubungan antar komponen melalui fitur *assembly (mates)* untuk memastikan tidak terjadi interferensi. Kedua, analisis perhitungan numerik terhadap daya listrik, kerapatan arus, dan estimasi panas sebagai langkah verifikasi terhadap hasil simulasi. Ketiga, analisis pengaruh arus konstan terhadap kestabilan proses *anodizing*, difokuskan pada hubungan antara arus listrik, distribusi panas, dan kestabilan reaksi elektrokimia. Keempat, analisis simulasi COMSOL untuk mengetahui karakteristik distribusi arus listrik dan temperatur pada sistem selama proses berlangsung, meliputi parameter electric potential, *Current Density*, distribusi temperatur, dan konsentrasi panas. Kelima, evaluasi dan validasi desain dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap standar industri *Sulfuric Acid Anodizing (SAA)* serta teori dan referensi yang digunakan untuk menentukan kelayakan desain [11].

Hasil dan Pembahasan

Pemodelan komputasi dinamis dilakukan menggunakan COMSOL Multiphysics 5.6 secara *time-dependent* untuk menangkap fenomena transien selama proses elektrolisis berlangsung. Rekapitulasi properti material dan kondisi batas yang digunakan sebagai input simulasi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Properti dan Kondisi Batas Input Simulasi.

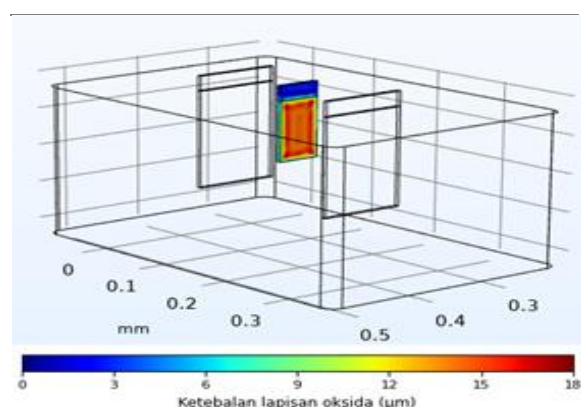
Parameter	Nilai	Satuan
Konduktivitas termal	167	W/m.K
Kapasitas panas spesifik (Cp,Al)	896	J/kg.K

Massa jenis (ρAl)	2.790	kg/m ³
Resistivitas elektrik	$3,99 \times 10^{-8}$	Ω.m
Konduktivitas termal	0,6	W/m.K
Kapasitas panas spesifik fluida	3.900	J/kg.K
Volume domain fluida aktif	$2,852 \times 10^{-2}$	m ³
Total input daya kalor (P)	48,0	Watt
Laju kalor volumetrik (qvol)	$4,8 \times 10^6$	W/m ³

Hasil simulasi pertumbuhan ketebalan lapisan oksida yang diekstraksi melalui fitur *Derived Values* disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Simulasi Pertumbuhan Ketebalan Lapisan Oksida

Waktu (s)	Ketebalan (mm)	Ketebalan (μm)
0	0	0
1200	0,0089823	8,98
2400	0,017965	17,97



Gambar 5. Ketebalan Lapisan Oksida

Berdasarkan Tabel 2, pertumbuhan lapisan oksida berlangsung secara linear terhadap waktu. Pada detik ke-1.200 (20

menit pertama), ketebalan lapisan yang terbentuk adalah 8,98 μm, kemudian meningkat menjadi 17,97 μm pada akhir proses di detik ke-2.400 (40 menit). Pola pertumbuhan linear ini menjadi indikasi bahwa mekanisme kontrol arus konstan bekerja dengan baik, karena rapat arus yang stabil menghasilkan laju pembentukan lapisan oksida yang konsisten sepanjang durasi proses. Jika merujuk pada standar proses *Sulfuric Acid Anodizing* (SAA) yang menargetkan ketebalan lapisan pada kisaran 15–25 μm [4], nilai hasil simulasi ini berada di dalam rentang yang dapat diterima dan tergolong memenuhi syarat teknis, tanpa munculnya anomali seperti *over-anodizing* maupun penipisan lapisan akibat disolusi kimia berlebihan. Untuk mencapai ketebalan optimal 20 μm, secara teoritis diperlukan tambahan waktu proses sekitar 4–5 menit, sehingga total durasi yang dibutuhkan berada pada kisaran 44–45 menit.

Untuk memvalidasi keandalan fisis, elektrik, dan termal dari stasiun kerja *anodizing* yang dirancang, dilakukan komputasi numerik terhadap beberapa parameter utama. Hasil perhitungan tersebut dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Kuantitatif Parameter *Anodizing*

Parameter	Hasil Perhitungan	Satuan
Volume total bak <i>anodizing</i>	40,64	liter
Volume cairan elektrolit	28,52	liter
Rapat arus konstan	1,5	A/dm ²
Massa lapisan (Hukum Faraday)	1,437	gram
Ketebalan lapisan anoda	17,96	μm
Daya listrik	48	Watt

Energi kalor		
total tanpa pendinginan	115.200	Joule

Volume total bak *anodizing* dihitung dari dimensi panjang 460 mm, lebar 310 mm, dan tinggi 285 mm:

$$V_{bak} = 460 \text{ mm} \times 310 \text{ mm} \times 285 \text{ mm}$$

$$V_{bak} = 40.641.000 \text{ mm}^3 = 40,64 \text{ liter}$$

Luas permukaan aktif spesimen (Aaktif) diperoleh dari hubungan antara total arus ($I = 4 \text{ A}$) dan rapat arus konstan ($J = 1,5 \text{ A/dm}^2$) melalui persamaan $I = J \times A_{aktif}$

$$A_{aktif} = I / J = 4 \text{ A} / 1,5 \text{ A/dm}^2 = 2,667 \text{ dm}^2 = 266,7 \text{ cm}^2$$

Massa lapisan oksida yang terbentuk selama 40 menit (2.400 detik) dihitung menggunakan Hukum Faraday (Persamaan 3), dengan massa molar Al_2O_3 $M = 0,10196 \text{ kg/mol}$, arus konstan $I = 4 \text{ A}$, jumlah elektron $n = 6$, konstanta Faraday $F = 96.500 \text{ C/mol}$, dan efisiensi arus $\eta = 0,85$:

$$m = (0,10196 \times 4 \times 2.400 \times 0,85) / (6 \times 96.500) = 1,437 \text{ gram}$$

Ketebalan fisik lapisan anoda (s):

$$S = 1,437 / (3,0 \times 266,7) = 1,437/800,1 = 0,0017961 \text{ cm} = 17,96 \text{ } \mu\text{m}$$

Nilai ketebalan hasil perhitungan analitik tersebut (17,96 μm) sangat mendekati nilai hasil simulasi transien COMSOL Multiphysics pada Tabel 2 (17,97 μm), dengan selisih relatif hanya sekitar 0,06%. Kesesuaian ini menunjukkan bahwa fitur *Derived Values* pada COMSOL, yang diprogram berdasarkan formulasi Hukum Faraday yang sama, menghasilkan solusi yang konsisten dengan perhitungan tertutup (*closed form*) secara manual. Selisih yang sangat kecil tersebut wajar terjadi akibat diskritisasi ruang pada proses meshing serta skema integrasi numerik pada *solver time-dependent*, bukan disebabkan oleh perbedaan model fisis, sehingga hasil ini memvalidasi keakuratan model elektrokimia yang diterapkan pada simulasi.

Daya listrik dihitung menggunakan Persamaan 4 dengan tegangan 12 Volt dan arus 4 Ampere:

$$P = 12 \times 4 = 48 \text{ Watt}$$

Energi kalor total (Q_{kalor}) yang masuk:

$$Q_{\text{kalor}} = P \cdot t = 48 \text{ Watt} \times 2.400 \text{ detik}$$

$$= 115.200 \text{ Joule}$$

Setelah proses simulasi dan perhitungan numerik selesai, hasil integrasi seluruh komponen yang telah dirancang bak *anodizing*, elektroda anoda-katoda, cantelan, rangka meja dua tingkat, serta komponen sistem kontrol arus divisualisasikan dalam bentuk *assembly* lengkap sistem *anodizing*. *Power supply* DC dikonfigurasi pada mode arus konstan (galvanostatis) dengan keluaran nominal 4 Ampere dan 12 Volt, sedangkan sensor arus ACS712 berbasis efek *Hall* diintegrasikan secara seri pada jalur *output* positif untuk memantau kestabilan arus secara *real-time* [12]. Desain *assembly* ini menunjukkan bahwa seluruh komponen dapat terintegrasi secara proporsional sesuai dengan spesifikasi geometri yang telah ditetapkan, dengan tata letak yang memisahkan area basah dan instrumen elektronik untuk menjamin keamanan operasional.

Hasil Simulasi menggunakan COMSOL Multiphysics 5.6 dilakukan dengan mengintegrasikan Hukum Faraday ke dalam fitur *Derived Values* untuk mengamati pertumbuhan ketebalan lapisan oksida secara transien selama 2.400 detik. Pemilihan perangkat ini didasarkan pada kemampuan *multiphysics coupling* yang memungkinkan interaksi antara fenomena elektrokimia dan perpindahan panas direpresentasikan dalam satu model secara bersamaan [9]. Hasil simulasi menunjukkan pertumbuhan lapisan oksida yang berlangsung secara linear terhadap waktu, dengan ketebalan 8,98 μm pada menit ke-20 dan mencapai 17,97 μm pada menit ke-40. Pola linear ini merupakan konsekuensi langsung dari metode kontrol arus konstan, di mana kerapatan arus yang dipertahankan tetap menyebabkan laju reaksi elektrokimia berlangsung stabil sehingga pertumbuhan lapisan oksida terjadi secara lebih seragam sepanjang proses pada aluminium 6061 [13]. Hasil ini juga selaras dengan temuan eksperimental yang membuktikan bahwa

peningkatan waktu *anodizing* berbanding lurus dengan peningkatan ketebalan lapisan oksida [6].

Jika dibandingkan dengan penelitian yang menghasilkan ketebalan lebih dari 16 μm dalam 45 menit menggunakan metode tegangan konstan [2], simulasi pada penelitian ini menghasilkan ketebalan 17,97 μm hanya dalam 40 menit menggunakan metode arus konstan. Perbedaan ini dapat dijelaskan melalui mekanisme kompensasi tegangan: ketika resistansi sistem meningkat akibat pertumbuhan lapisan oksida, power supply secara otomatis menaikkan tegangan keluaran untuk mempertahankan arus yang ditetapkan, sehingga laju reaksi elektrokimia tidak mengalami penurunan sebagaimana yang terjadi pada metode tegangan konstan. Ketebalan 17,97 μm yang dihasilkan masih berada dalam rentang target SAA sebesar 15–25 μm ; untuk mencapai ketebalan optimal 20 μm dibutuhkan tambahan waktu sekitar 4–5 menit, sehingga durasi proses yang direkomendasikan berada pada kisaran 44–45 menit.

Secara keseluruhan, hasil simulasi mengindikasikan bahwa penerapan kontrol arus konstan berpotensi memberikan dampak positif terhadap stabilitas proses dan kualitas lapisan, meskipun klaim ini masih memerlukan validasi lebih lanjut melalui pengujian eksperimental dan perbandingan dengan sistem kontrol lain. Sensor ACS712 dalam sistem yang dirancang berperan memantau nilai arus aktual secara *real-time* dan memberikan umpan balik kepada sistem kontrol, sehingga fluktuasi resistansi akibat pertumbuhan lapisan oksida tidak berimbas pada ketidakstabilan arus [13]. Hal ini sesuai dengan pernyataan bahwa pemantauan arus menggunakan sensor ACS712 penting untuk memastikan arus tetap stabil sehingga lapisan oksida terbentuk secara lebih seragam [14]. Dengan demikian, sistem *anodizing* yang dikembangkan memiliki potensi baik sebagai perangkat skala laboratorium yang terkontrol, tidak hanya menghasilkan lapisan mendekati standar

industri, tetapi juga menawarkan tingkat keterulangan (*repeatability*) yang lebih baik dibandingkan sistem konvensional berbasis pengaturan manual [15].

Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan dan simulasi sistem *anodizing* Aluminium 6061 dengan kontrol arus konstan terintegrasi menggunakan SolidWorks dan COMSOL Multiphysics 5.6, diperoleh dua kesimpulan utama. Pertama, sistem *anodizing* berhasil dirancang dengan bak berbahan HDPE berkapasitas elektrolit aktif 28,52 liter, konfigurasi *dual cathode* Timbal yang mengapit anoda Aluminium 6061 pada jarak 100 mm, serta *power supply* DC bermode galvanostatis 4 Ampere/12 Volt yang dipantau oleh sensor arus ACS712 berbasis efek *Hall* untuk menjaga stabilitas rapat arus secara *real-time*. Kedua, hasil simulasi COMSOL Multiphysics memvalidasi bahwa kontrol arus konstan menghasilkan pertumbuhan lapisan oksida (Al_2O_3) yang bersifat linear terhadap waktu, mencapai 8,98 μm pada menit ke-20 dan 17,97 μm pada menit ke-40, yang berada dalam rentang standar *Sulfuric Acid Anodizing* (15–25 μm), sehingga hasil ini menunjukkan bahwa desain sistem berpotensi diimplementasikan pada skala eksperimen laboratorium, dengan catatan diperlukan validasi eksperimental lebih lanjut untuk memastikan kesesuaiannya dengan kondisi proses yang sesungguhnya.

Untuk penelitian selanjutnya disarankan dilakukan realisasi dan pengujian fisik alat secara eksperimental sebagai langkah validasi terhadap hasil simulasi, termasuk pengukuran ketebalan lapisan oksida menggunakan *eddy current thickness gauge* atau pengamatan penampang SEM (*Scanning Electron Microscopy*). Selain itu, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena hanya menganalisis satu kombinasi parameter proses, sehingga penelitian selanjutnya perlu mengkaji pengaruh variasi rapat arus, tegangan, suhu elektrolit, waktu *anodizing*, serta jarak anoda-katoda terhadap distribusi

arus dan ketebalan lapisan oksida yang dihasilkan. Selain itu, direkomendasikan penambahan sistem pendingin otomatis (*cooling system*) untuk menjaga suhu elektrolit tetap pada rentang optimal 25–30 °C, mengingat daya total 48Watt yang dikonversikan menjadi kalor volumetrik berpotensi menaikkan suhu larutan secara signifikan apabila tidak dikelola.

Ucapan Terimakasih

Saya mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Tidar, khususnya Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Perancangan Manufaktur, serta kepada Ir. Trisma Jaya Saputra, S.T., M.T. dan Adityo Noor Setyo Hadi Darmo, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing atas bimbingan dan arahan yang telah diberikan selama penyusunan penelitian ini. Terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu sehingga penelitian saya ini dapat diselesaikan dengan baik.

Referensi

- [1] I. P. Wardani, V. A. Setyowati, and I. Suheni, "Pengaruh Natural Aging Sebelum Proses Artificial aging Terhadap Sifat Mekanik Aluminium 606," 2020.
- [2] T. Ratnasari and A. Senen, "Perancangan Prototipe Alat Ukur Arus Listrik Ac dan Dc Berbasis Mikrokontroler Arduino Dengan Sensor Arus Acs-712 30 Ampere".
- [3] M. Muzaki, I. Mashudi, M. Fakhrudin, A. M. Anwar, R. A. N. Paranata, and G. Wiganata, "Analisis Pengaruh Variasi Beda Potensial dan Waktu Proses Anodizing terhadap Karakteristik Lapisan Oksida Aluminium 6061," *j.rekayasa.mesin.*, vol. 17, no. 1, p. 59, May 2022, doi: 10.32497/jrm.v17i1.3020.
- [4] M. Paz Martínez-Viademonte, S. T. Abrahami, T. Hack, M. Burchardt, and H. Terryn, "A Review on Anodizing of Aerospace Aluminum Alloys for Corrosion Protection," *Coatings*, vol. 10, no. 11, p. 1106, Nov. 2020, doi: 10.3390/coatings10111106.
- [5] M. H. Fahmi and W. Zamrudu, "Studi Literatur Pengaruh Kuat Arus, Tegangan, Suhu dan Waktu Terhadap Pelapisan Logam dengan Metode Electroplating," *Distilat: J. Tekn. Sep*, vol. 7, no. 2, pp. 406–413, May 2023, doi: 10.33795/distilat.v7i2.234.
- [6] A. Wisnujati and F. Yudhanto, "Karakterisasi Lapisan Oksida Hasil Anodizing Pada Aluminium dengan Variabel Waktu Pencelupan," *JRM*, vol. 14, no. 2, pp. 525–536, Aug. 2023, doi: 10.21776/jrm.v14i2.1309.
- [7] M. Sungkar and R. Darpono, "Rancang Bangun Conveyor Auto Electroplating Berbasis Arduino Mega," *polektro*, vol. 9, no. 1, pp. 7–9, Jan. 2020, doi: 10.30591/polektro.v9i1.1793.
- [8] W. A. Suteja and A. Surya Antara, "Analisis Sensor Arus Invasive ACS712 dan Sensor Arus Non Invasive SCT013 Berbasis Arduino," *portk*, vol. 8, no. 1, pp. 13–21, May 2021, doi: 10.33387/protk.v8i1.2116.
- [9] N. T. Ali Othman, H. Sahul Hameed, and M. I. Rosli, "Simulation On Red Blood Cell's Separation in Microchannel by Using Comsol© Multiphysics," *Jurnal Teknologi*, vol. 84, no. 2, pp. 103–112, Jan. 2022, doi: 10.11113/jurnalteknologi.v84.17708.
- [10] A. Abou Basaif, N. F. Mohd Nasir, Z. Zakaria, I. Balkhis, S. Sarkawi, and J. Abd Jalil, "Simulation of Single Channel Biological Tissue Spectroscopy Using Comsol Multiphysics," *Jurnal Teknologi*, vol. 77, no. 28, Dec. 2015, doi: 10.11113/jt.v77.6796.
- [11] P. Totaro and B. Khusid, "Effect of Current Density Ramping on the Growth Rate and Structure of AA2024-T3," *Materials*, vol. 15, no. 9, p. 3258, May 2022, doi: 10.3390/ma15093258.
- [12] S. Z. H. P. Zahra and Moh. Toifur, "Plating Nikel pada Kawat Tembaga untuk Meningkatkan Kepekaan

- sebagai Sensor Suhu Rendah,” *JIPFRI*, vol. 9, no. 1, pp. 24–30, Jun. 2025, doi: 10.30599/jipfri.v9i1.3402.
- [13] J. Cabral-Miramontes *et al.*, “Corrosion Resistance of Hard Coat Anodized AA 6061 in Citric–Sulfuric Solutions,” *Coatings*, vol. 10, no. 6, p. 601, Jun. 2020, doi: 10.3390/coatings10060601.
- [14] S. Singgih, M. Toifur, and S. Suryandari, “Experimental Design in Constructing Low Temperature Sensor Based on Resistance Temperature Detector (RTD),” *indonesian.j.of.science.and.education*, vol. 4, no. 2, p. 99, Oct. 2020, doi: 10.31002/ijose.v4i2.2758.
- [15] S. Purwanto, “Optimasi Arus Dan Tegangan Pada Alat Anodizing Portable,” *sutet*, vol. 9, no. 2, pp. 56–63, Dec. 2019, 10.33322/sutet.v9i2.525.